

Т. В. Гоненко

*Омский институт водного транспорта (филиал) ФГБОУ ВО «СГУВТ»
(г. Омск, Россия)*

В. Ф. Хацевский

*Павлодарский государственный университет имени С. Торайгырова
(г. Павлодар, Россия)*

ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ПЛОСКИХ ПЛАЗМЕННО-НАПЫЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

Плазменные электротехнологии находят все более широкое применение в различных областях техники. С помощью плазменных технологий могут быть получены покрытия различного состава с широким диапазоном свойств. Преимуществом плазменной технологии является возможность формирования нагревательного элемента как на плоской, так и на цилиндрической поверхностях. Используемые изоляционные и резистивные материалы обеспечивают плазменно-напыленным электронагревателям широкий температурный диапазон применимости. Возможность распределения нагревательного элемента практически по всей площади подложки повышает равномерность нагрева. Это, а также малое термическое сопротивление между нагревательным слоем и подложкой, позволяет снизить тепловую инерционность, повысить удельную поверхностную мощность и надежность в работе. Возможность создания покрытий из водостойких материалов делает плазменно-напыленные нагреватели перспективными для применения в электрических нагревательных установках различного назначения.

Нагревательные элементы, полученные методом плазменного напыления, имеют высокую механическую прочность в широком диапазоне рабочих температур, высокую надежность, значительные пределы изменения удельной мощности. Важнейшее их преимущество - технологичность изготовления при серийном производстве.

Несмотря на определенные успехи, достигнутые в повышении качества газотермических покрытий и, главным образом нанесенных с помощью плазмотронов, напыленные покрытия сохраняют основные, присущие им недостатки. В первую очередь это относится к адгезионной прочности и пористости. И если недостаточная адгезионная прочность может привести к разрушению покрытий на деталях, работающих в условиях ударных нагрузок, то высокая пористость может вызвать отслоение любого покрытия, т.к. в этом случае возможно окисление как самого покрытия, так и подложки.

Основные характеристики покрытий при высокотемпературном напылении (адгезия, когезия, пористость, износостойкость и др.) определяются не только выбором материалов и разработкой составов покрытий, но и многими теплофизическими и технологическими аспектами процесса напыления.

К основным недостаткам покрытий следует отнести их низкую адгезионную прочность и высокую пористость. Одной из причин, приводящих к указанным недостаткам, является то, что температура и скорость струй плазмы распределены по сечению неравномерно, вследствие чего частицы, приходящие на поверхность, имеют различные значения температуры и скорости.

Исследования поперечного сечения покрытия, нанесенного самофлюсующимся порошком ПГ-ХН80СРЗ методом плазменного напыления показало, что часть частиц приходит на поверхность основы в непроплавленном состоянии и удерживается на ней только за счет закрепления пластичными частицами. Кроме того, даже у полностью расплавленных частиц сварные участки составляют часть площади контакта

"частица-основа" и "частица-частица". Таким образом, формирование покрытия последовательной укладкой множества частиц неизбежно приводит к появлению микропустот, особенно на их стыках. Покрытие формируется в атмосфере, поэтому микрополости заполняются газом, что ухудшает свойства межслойных границ, имеющих наибольшую насыщенность адсорбированными газами. Взаимодействие с атмосферой, адсорбция газов и оседание пылевидных фракций существенно ухудшают свойства межслойной зоны покрытия.

В практике газотермического нанесения покрытий широкое распространение получила последующая за напылением упрочняющая обработка напыленного слоя.

В первую очередь данная обработка применяется для увеличения адгезионной и когезионной прочности покрытий, снижения пористости, выравнивания микро- и макроструктуры. Известны несколько методов высокотемпературного упрочнения напыленных покрытий: спекание, пропитка с термообработкой, пластическое деформирование, оплавление. Самым распространенным способом упрочнения покрытий является их оплавление.

Помимо ликвидации пористости, удаление окислов, оплавление покрытия ведет к значительному увеличению взаимной диффузии элементов покрытия и основы, что повышает адгезию и, соответственно, прочность покрытия. Если у неоплавленных покрытий адгезионная прочность не превышает 3...5 кГс/мм², то после оплавления этот показатель возрастает до 28...40 кГс/мм² и более. Наряду с этим, при оплавлении на различных режимах могут изменяться физико-механические свойства покрытия вследствие изменения структуры оплавленного сплава.

Таким образом, покрытие, полученное напылением с последующим оплавлением, в отличие от неоплавленного, способно выдержать значительные механические нагрузки: изгиб, удар и т.д.

Оплавление покрытий производят различными способами, как путем нагрева одновременно всей обрабатываемой поверхности (например, в печах, соляных ваннах), так и с помощью локального нагрева концентрированными источниками энергии (например, оплавление лучом лазера, электронным пучком, электроконтактным нагревом, электрической дугой, микроплазменным источником, пламенем газовой горелки, плазменной струей).

Оплавление покрытий в печах можно производить в восстановительной атмосфере, создаваемой газами при сгорании древесного угля или аммиаком, либо в нейтральной атмосфере, для образования которой используют водород или азот. Также весьма эффективно, с точки зрения качества покрытий, использование вакуумной печи. По данным, приведенным в работе, износостойкость покрытий, оплавленных в вакуумной печи, превышает износостойкость покрытий, оплавленных с помощью газовой горелки. Наилучшие характеристики получены после термообработки в печи в течении одного часа при температуре 1303 К (ПГ-ХН80СР2), 1293 К (ПГ-ХН80СР3), 1263 К (СНГН). По данным после термообработки в печи с неокислительной атмосферой получено практически беспористое покрытие с адгезионной прочностью, превышающей 15 кГс/мм².

Довольно распространенным методом оплавления является высокочастотный индукционный нагрев. В этом случае в зависимости от геометрии, размеров индуктора и обрабатываемой детали нагрев осуществляется либо одновременно всей поверхности, либо определенных участков. Условия проплавления представляют собой соответствующее сочетание времени нагрева, потребляемой мощности и формы индуктора.

С точки зрения физико-механических характеристик получаемого композита "основа-покрытие" в целом, а также из экономических показателей процесса наиболее рациональным и эффективным является использование для нагрева концентрированных источников энергии, так как в этом случае не происходит значительного

разогрева всей массы обрабатываемой детали.

Лазерная обработка покрытий уменьшает количество пор и окислов, существенно увеличивает адгезионную прочность покрытий. За счет изменения параметров луча может регулироваться глубина проплавления слоя, она может быть равна толщине предварительно нанесенного слоя, может превосходить ее и расплавлять часть основы. Высокая скорость нагрева при лазерном оплавлении позволяет сохранять исходную (в том числе мелкозернистую) структуру материала покрытия.

Оплавление покрытий пучком электронов, имеющих длину пробега в облучаемом материале равную или несколько большую толщины необходимого слоя расплавления, позволяет повысить допускаемую плотность мощности в пучке, скорость и производительность оплавления, а также исключить закипание расплава и вынос его из зоны нагрева. Покрытие, получаемое в этом случае, обладает высокой однородностью и хорошей адгезионной прочностью. Оплавление пучком электронов проводят как в специальных вакуумных камерах, так и в атмосферном воздухе.

Избежать перемешивания покрытия с основой можно при использовании микроплазменного нагрева. Процесс микроплазменного оплавления характеризуется незначительной зоной термического влияния (до 300 мкм). При этом микроплазменная струя интенсивно нагревает только покрытие. Существенным недостатком микроплазменного нагрева является его низкая производительность.

Самым распространенным способом оплавления является оплавление с помощью ацетилено-кислородных горелок. Нагрев осуществляют нейтральным пламенем. Данный способ привлекает простотой и доступностью оборудования и самой технологии.

Также известно применение в качестве источника нагрева плазменной струи. Ею можно обрабатывать любые материалы, включая тугоплавкие соединения.

Оплавление с помощью лазерного луча и электронного пучка позволяет получить высокие физико-механические характеристики напыленных покрытий при сохранении исходной структуры материала основы. Но большим недостатком данных методов является сложность и высокая стоимость используемого оборудования. При этом работа с электронно-лучевыми установками требует специальных мер по защите обслуживающего персонала. Что касается технико-экономических показателей процессов обработки лучом лазера и электронным пучком, то и здесь имеются определенные недостатки. В первую очередь, это относится к КПД нагрева поверхности. По данным при длине волны $10 \cdot 10^{-6}$ м, отвечающей наиболее мощным СО₂-лазерам, для большинства компактных металлов коэффициент отражения равен 0,85...0,95, т.е. основная доля излучения не используется при нагреве. В работах, посвященных исследованию процессов обработки материалов электронными пучками, отмечается, что из-за отражения электронов от поверхности отношение мощности, поглощенной материалом, к исходной мощности пучка составляет для железа (стали) 0,25...0,3 и лишь для элементов с большими атомными номерами, например, для вольфрама, достигает 0,5. Таким образом, и в данном случае имеет место существенная потеря энергии.

Также необходимо отметить, что при использовании лазерных и электронно-лучевых установок возникают проблемы с обработкой деталей со сложной геометрией. Таким образом, в связи с отмеченными выше недостатками, обработка покрытий лучом лазера или электронным пучком на практике применяется крайне редко.

Оплавление в печах и соляных ваннах является довольно технологичным методом, но значительный прогрев всей массы детали может привести к ухудшению структуры материала основы. Данный метод имеет ограничения также по габаритам обрабатываемых деталей и, кроме того, он не позволяет производить оплавление тугоплавких композиционных материалов на сталях.

Недостатком индукционного нагрева является необходимость В каждом от-

дельном случае изготавливать индуктор в соответствии с конфигурацией изделия. Кроме того, при использовании индукционного нагрева сложно обрабатывать покрытия из тугоплавких соединений на немагнитных сплавах.

К недостаткам электроконтактного нагрева следует отнести трудность обработки деталей со сложной геометрией и невозможность обработки неэлектропроводных материалов.

Что касается упрочнения покрытий пропиткой с последующей термообработкой, то в данной технологии предусматривается объемный нагрев всего изделия, а, следовательно, имеют место недостатки, присущие оплавлению покрытий в печах.

Недостатки использования для оплавления дуговой сварки в инертной среде и микроплазменного нагрева отмечены выше.

С точки зрения технологичности процесса из применяемых методов наиболее рационален плазменный способ оплавления. В данном случае возможна обработка любых материалов и не требуется дополнительное дорогостоящее оборудование.

Кроме того, использование в качестве концентрированного источника энергии плазменной струи позволяет в широких пределах управлять температурно-временными параметрами процесса обработки напыленных покрытий. А возможность использования в качестве плазмообразующей среды недорогих и недефицитных газов, вплоть до воздуха, делает этот метод особенно привлекательным.

Но существенным недостатком плазмоструйного нагрева является то, что существующие напылительные плазмотроны имеют высокую скорость истечения плазменной струи (рассчитаны на работу в турбулентном режиме). Таким образом, при работе на малой дистанции из-за высокого давления плазменной струи на напыленную поверхность может происходить нарушение слоя покрытия, при увеличении дистанции очень сложно прогреть обрабатываемую поверхность, так как у напылительных плазмотронов из-за высокого уровня турбулентности на срезе выходного электрода протяженность высокоэнергетической зоны струи плазмы невелика.

В связи с этим, представляется перспективным оплавление покрытий высоконтальной ламинарной струей плазмы, имеющей небольшое давление на обрабатываемую поверхность, без подачи порошка для снижения пористости и разнотолщинности нанесенных слоев с одновременным повышением уровня сплавления порошковых материалов с целью увеличения срока службы и безаварийной работы плазменно-напыленных нагревателей.

Список использованных источников

1. Хацевский К.В., Гоненко Т.В. Энергоэффективные технологии электронагрева жидкостей и газов. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – 176 с.
2. Хацевский В.Ф., Гоненко Т.В., Хацевский К.В. Современные энергосберегающие технологии и установки электронагрева – Павлодар: Изд-во Кереку, 2014. – 166 с.